

# Estructuras de hormigón armado bajo carga dinámica severa.

## Parte II: Comportamiento de los materiales.

En la revista Cimbra nº 394 se publicaba la primera parte de este artículo en donde se analizaba con detalle el impacto de los explosivos, las ondas que se generan y los efectos de éstas sobre los edificios. Ahora, los autores de este artículo, se detendrán en el comportamiento de los materiales que actúa de manera diferente si es sometido a una carga estática que a una dinámica.

---

**Alejandro Alañón Juárez.**

Ingeniero Técnico de Obras Públicas  
Máster en Técnicas Experimentales  
Avanzadas en la Ingeniería Civil  
Departamento de Construcción y Agronomía.  
E.P.S. de Ávila - USAL

**Anastasio P. Santos Yanguas.**

Dr. Ingeniero de Minas  
Departamento de Ingeniería de Materiales.  
E.T.S.I. de Minas - UPM

**María Jesús Vázquez Gallo.**

Dra. Ciencias Matemáticas.  
Departamento de Ingeniería Civil: Servicios  
Urbanos. E.U.I.T. de Obras Públicas - UPM

---

### INTRODUCCIÓN

**L**a simulación numérica del comportamiento de una estructura frente a impactos y/o explosiones puede resultar una cuestión de gran interés, ya que permitiría racionalizar y ajustar el dimensionado de las estructuras o elementos que pudiesen ser susceptibles de soportar este tipo de situaciones, buscar sus puntos débiles, o, en el caso de estructuras o elementos ya construidos, prever su comportamiento.

El comportamiento del hormigón es diferente bajo carga estática que bajo car-

ga dinámica. La resistencia frente a la rotura aumenta, tanto a tracción como a compresión, bajo la carga dinámica.

Bajo carga severa, cuando un proyectil o un fragmento alcanza un objetivo de hormigón, éste se deformará y fisurará, produciéndose vibraciones en la estructura. La presión en la parte frontal de la punta del proyectil es varias veces superior a la resistencia estática uniaxial del hormigón y a la presión de confinamiento lateral, propagándose una onda de tensión desde la punta del proyectil que, además, producirá aplastamientos en los puntos de contacto. Como el hormigón es muy débil a tracción, la onda de tensión obtenida cuando la onda de compresión golpea la parte trasera de la pared puede provocar fisuraciones en dicha zona, y roturas en dirección lateral. En cuanto a la profundidad de penetración, los valores de las resistencias a compresión y a tracción del hormigón son parámetros de los que depende dicha profundidad. Indicar, a título de ejemplo, que el tamaño del cráter depende de la resistencia a la tracción.

Zielinski [1] siguió un enfoque fenomenológico donde se compararon las tensiones producidas por cargas estáticas y dinámicas. Se observó un cambio de la geometría del plano de fractura. Con el aumento en la velocidad de la carga, la

cantidad de áridos fracturados aumentó. Por otra parte, se observaron múltiples fracturas a velocidades de carga altas, como se muestra en la Figura 1.

Estos mecanismos de fractura tienen una influencia directa sobre la relación tensión-deformación del hormigón bajo carga dinámica: la absorción de energía es mucho mayor con múltiples planos de fractura, la rigidez se incrementa, así como la tensión de rotura cuando existe una fuerte variación en la carga. Esto se muestra esquemáticamente en el gráfico tensión-deformación de la Figura 2.

### COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN BAJO CARGA ESTÁTICA

El hormigón habitualmente se caracteriza mediante la tensión uniaxial de compresión, como se muestra en la Figura 3. Para tensiones axiales en el hormigón, la resistencia a tracción es inferior a la décima parte de la resistencia a compresión.

Sin embargo, las estructuras reales están sometidas a tensiones multiaxiales. Es conocido que la resistencia y la rigidez del hormigón aumentan cuando se encuentra confinado. En la Figura 4 se muestra el diagrama tensión-deformación para el hormigón en compresión con distintos valores de presión lateral (de confinamiento).

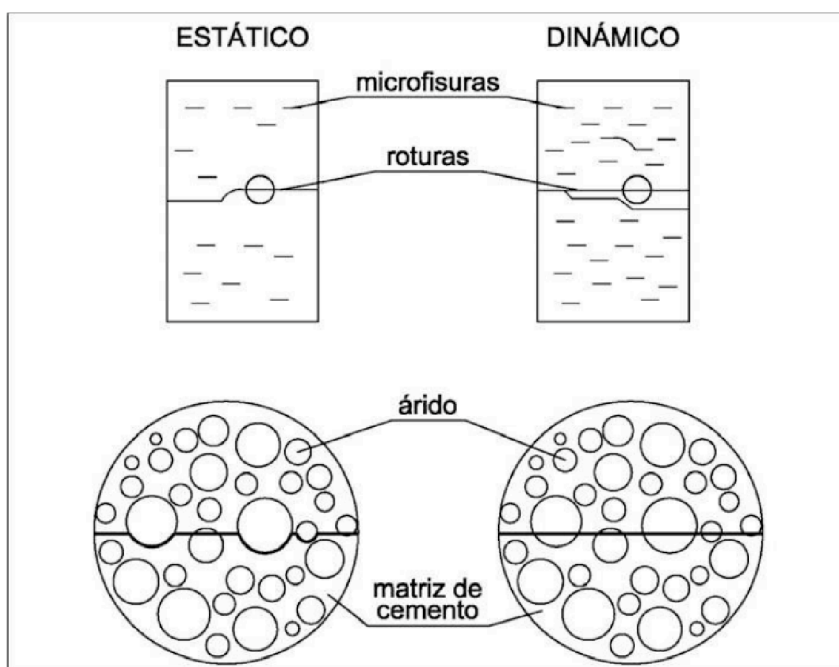


Figura 1. Plano de rotura para carga estática y dinámica, basado en Ziellinski [1]

Cuando el hormigón está sometido a presiones muy altas, como en una situación de impacto, la presión lateral aumentará. Debajo del frente de contacto del proyectil o fragmento, el hormigón está expuesto a enormes presiones de confinamiento y se comporta plásticamente, disipando una gran cantidad de energía. La presión de confinamiento bajo la carga de impacto puede ser de varios cientos de MPa. En un ensayo estándar triaxial, la resistencia final del hormigón puede aumentar enormemente. Los experimentos realizados por Bazant y otros [2], con un hormigón de resistencia a compresión uniaxial de 46 MPa, mostraron aumentos de la resistencia a rotura de 800 MPa como máximo.

En cuanto a la resistencia a tracción, ya se comentó que es muy débil en el hormigón. Cuando el hormigón se fisura la resistencia a tracción ha alcanzado el máximo, disminuyendo después rápidamente (fenómeno de ablandamiento de tracción). La resistencia a tracción apenas se ve afectada por la compresión lateral.

#### LOS EFECTOS DEL TIPO DE DEFORMACIÓN EN EL HORMIGÓN BAJO CARGA UNIAxIAL

El comportamiento del hormigón depende de la velocidad de la carga, efecto conocido como variación de tensión. La tasa de deformación en el material depende de cada caso de carga, como se muestra en la Figura 5 para distintos tipos de carga, tales como la fluencia, cargas estáticas, terremotos, golpes y cargas de explosión.

La resistencia, la capacidad de deformación y la energía de la fractura son parámetros importantes para la caracterización y descripción de la respuesta de hormigón. Para la carga dinámica, estos parámetros cambian en relación a la carga estática. Cuando el hormigón se somete a cargas de impacto, la resistencia del material va en aumento. El factor de crecimiento dinámico (DIF) se define como el aumento proporcional de la fuerza dinámica máxima en relación con la resistencia a la rotura estática. Para la carga dinámica, la resistencia a la compresión final puede ser más del doble que en el caso estático. Además, de acuerdo con Ross y

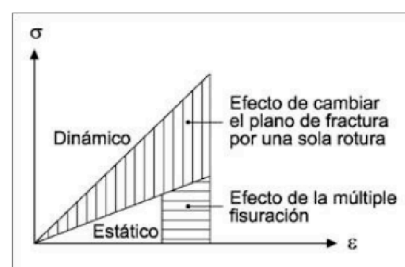


Figura 2. Vista esquemática del efecto de los mecanismos de fractura en la tensión de rotura, basado en Ziellinski [1]

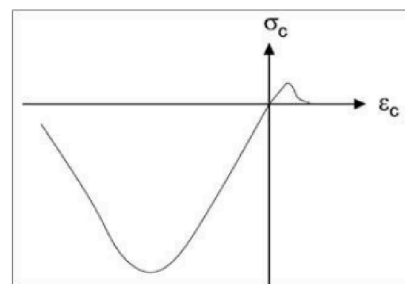


Figura 3. Diagrama tensión-deformación para carga uniaxial en el hormigón

otros [3], la resistencia última del hormigón a tracción aumenta de 5 a 7 veces con tasas de deformación muy altas.

La mayor resistencia se explica por el cambio en el plano de la fractura. Con un incremento en la variación de la carga, el hormigón tendrá múltiples fracturas y aumentarán las fracturas en el árido; como muestra la Figura 1.

Las dispersiones en los resultados se explican por las dificultades de medición en los ensayos dinámicos. Otra explicación es que el porcentaje de humedad en el hormigón influye en los efectos viscosos del mismo. El hormigón húmedo es más sensible a la tasa de deformación que el hormigón seco; ver Ross y otros [3].

Los efectos viscosos se explican por lo siguiente: cuando al hormigón se le somete a una carga de compresión, los poros se cierran. Debido al agua, los efectos viscosos desarrollan una presión interior tal que los poros se llenan de agua, lo que proporciona una resistencia cada vez mayor de material. Cuando se carga de forma paralela a los poros, se crea una fuerza de resistencia, ver Rossi y Toutlemond [4].



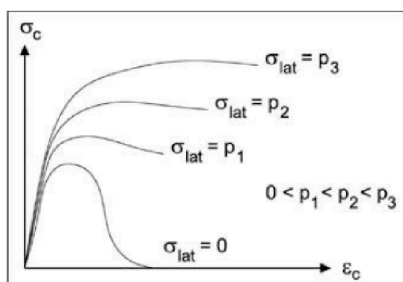


Figura 4. Vista esquemática del diagrama tensión-deformación incrementando la presión lateral (de confinamiento)

Para el hormigón en tracción, la resistencia a la fuerza se crea cuando los poros se abren. La curva de DIF tiene una parte plana y una parte más inclinada. Cuando la tasa de deformación es inferior a  $1 \text{ s}^{-1}$  predominan los efectos viscosos, y cuando la tasa de deformación es superior a  $10 \text{ s}^{-1}$  las fuerzas de inercia son las dominantes. Para el hormigón en compresión, las fuerzas de inercia predominan en variaciones de tensión de  $60\text{-}80 \text{ s}^{-1}$ ; ver Ross y otros [3].

## COMPORTAMIENTO DE LOS METALES BAJO CARGA DINÁMICA

Al igual que ocurre con el hormigón, las propiedades mecánicas de los metales también son sensibles a la tasa de deformación y también crecen al aumentar ésta. Sin embargo, la mejora de las características mecánicas responde a razones distintas que en el caso del hormigón debido a la composición tan diferente de ambos materiales. Si en el hormigón la mejora proviene de la variación en el desarrollo del proceso de fisuración, en el caso del acero

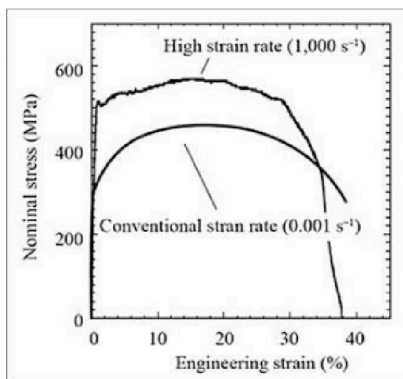


Figura 6. Diagrama constitutivo del acero en función de la velocidad de carga [5]



Figura 5. Tasa de deformación en distintos casos, basado en Bischoff y Perry

la explicación está en el desarrollo de las dislocaciones y su evolución al producirse las deformaciones a alta velocidad.

Una característica importante de estas imperfecciones, que se superpone a la acción de la deformación, es su libertad de movimiento relativo en el interior del material que determina a escala macroscópica (del orden de centímetros) una mayor o menor rigidez del metal. Además, para niveles de deformación situados en el campo plástico, la formación de nuevas imperfecciones determina las características de ductilidad del material.

Los efectos positivos que se miden en la respuesta mecánica de los metales sometidos a acciones aplicadas con velocidades elevadas de deformación son, principalmente los siguientes:

- un incremento de la tensión de plastificación;
- un incremento de la tensión de rotura;
- un incremento de la deformación última;
- un incremento de la deformación correspondiente a la carga máxima;
- un incremento de la ductilidad del material;

Sin embargo, y a diferencia de lo que ocurre en el hormigón, el módulo de elasticidad del material no es sensible a la velocidad de carga. Esta circunstancia puede atribuirse al hecho de que el comportamiento elástico del acero viene determinado por la densidad de las dislocaciones presentes o, a escala mesoscópica (del orden del milímetro), por las dimensiones y la forma de los granos que constituyen la red resistente del material, ambos factores son independientes de la tasa de deformación [7].

La tasa de deformación influye, sin embargo, en la extensión de la fase elástica debido a una mayor abertura de las dislocaciones presentes y en la extensión de la rama plástica debido al retardo en el desarrollo de nuevos defectos en el interior del metal.

Por otra parte, tampoco se pueden despreciar otros dos fenómenos que condicionan la respuesta de las probetas metálicas a la velocidad de carga:

**Aumento de la temperatura debido a la gran cantidad de energía desarrollada durante el ensayo.**

El uso de la sección inicial a la hora de representar la carga tensión-deformación del acero que no tiene en cuenta que en la fase plástica se produce una reducción de la sección del acero (estricción) lo cual aparece en la curva tensión-deformación como una reducción ficticia de la tensión resistida por el acero. La tensión referida a la sección inicial se denomina en lo que sigue tensión ingenieril con objeto de distinguirla de la tensión real o efectiva que tiene en cuenta la reducción de sección (ver Figuras 6 y 9).

Una interpretación de los datos experimentales que no tenga en cuenta estos factores podría dar lugar a conclusiones erróneas acerca del comportamiento del acero sometidos a altas tasas de deformación.

El primer efecto refleja el hecho de que, si durante el ensayo, la tasa de deformación es elevada (del orden de  $10^2$  a  $10^3 \text{ s}^{-1}$ ), la probeta está sometida a una transformación no isoterma debido a la transformación de energía mecánica en flujo de calor. Por este motivo, el diagrama constitutivo presenta dos valores distintos

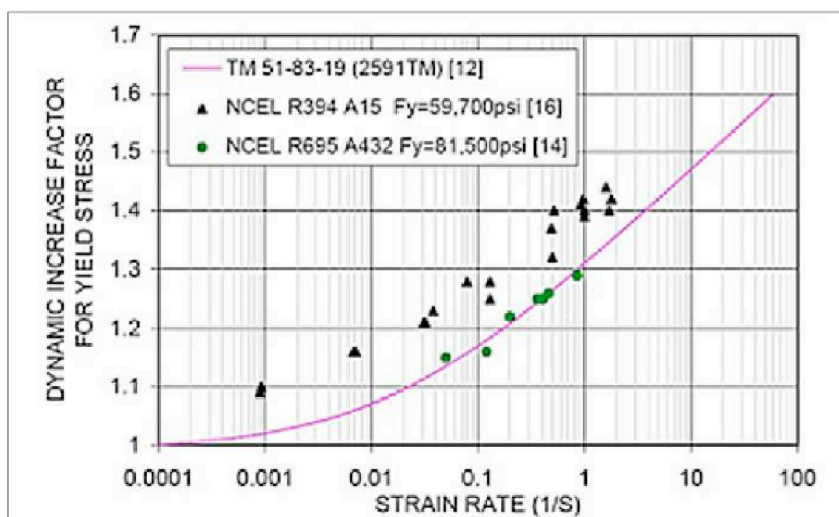


Figura 7. DIF en barras de acero: comparación entre datos experimentales [6]

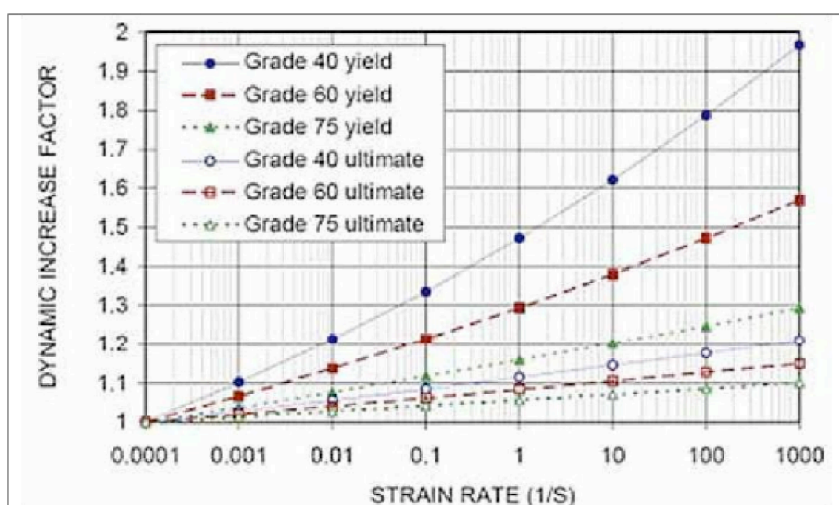


Figura 8. DIF puesto para las barras de acero según ASTM [6]

de la deformación de plastificación que se suceden tras la caída de tensión provocada por la reducción de las características mecánicas (ver curva 1 de la Figura 9).

Esto es debido al hecho de que en el interior del material, la gran cantidad de energía desarrollada provoca un aumento de la temperatura que empeora las características mecánicas, en algunos casos, provocando un reblandecimiento del material. Por lo tanto, si el objetivo del estudio no fuera determinar la respuesta real del material teniendo en cuenta los efectos provocados por el calentamiento de la probeta, sino que estuviera orientado al estudio de los mecanismos básicos de la respuesta mecánica del metal, sería necesario efectuar una corrección de los resultados experimentales para que el modelo teórico fuera independiente de la temperatura.

El otro aspecto no despreciable para una correcta interpretación de la sensibilidad a la tasa de deformación es la evolución del proceso de deformación y el fenómeno de la estricción que se presenta de forma relativamente difusa en la probeta con distintas velocidades de adelgazamiento pero con un máximo en la parte central.

Estos dos aspectos hacen que el diagrama de la tensión efectiva en la probeta sea muy diferente al que se obtiene sin corrección por la estricción. De hecho como resultado de los ensayos se obtienen típicamente curvas decrecientes tras la carga máxima mientras que si se corrige la tensión teniendo en cuenta la disminución de área, el diagrama constitutivo adquiere una forma con rama plástica creciente [8]. ■

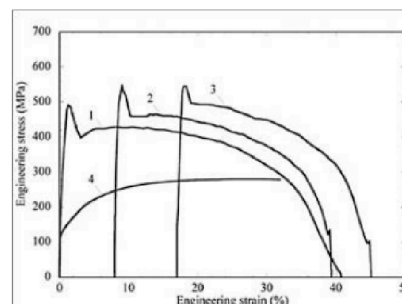


Figura 9. Curvas tensión-deformación para probetas sometidas a una tasa de deformación de  $1000 \text{ s}^{-1}$  [7]

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ziellinski A. J. (1982): Fracture of concrete and mortar under uniaxial impact tensile loading. Doctoral Thesis, Delft University of Technology.
- [2] Bazant Z. P., Bishop F. C. and Chang T. P. (1986): Confined Compression Tests of Cement Paste and Concrete up to 300-ksi. Journal of the American Concrete Institute, Vol. 83, No. 4, pp. 553-560.
- [3] Ross C. A., Jerome D. M., Tedesco J. W. and Hughes M. L. (1996): Moisture and strain rate effects on concrete strength. ACI Materials Journal, Vol. 93, No. 3, pp. 293-300.
- [4] Rossi P. and Toutlemonde F. (1996): Effect of loading rate on the tensile behaviour of concrete: Description of the physical mechanisms. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, Vol. 29, No. 186, pp. 116-118.
- [5] Uenishi A., Kuriyama Y., Yoshida H., Takahashi M. (2003). Material Characterization at High Strain Rates for Optimizing Car Body Structures for Crash Events. NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT N° 88.
- [6] Malvar L. J. and Crawford J. E., (1998.b). Dynamic Increase Factors for Steel Reinforcing Bars. Twenty-Eighth DDESB Seminar – Orlando, FL, pp. 1-17.
- [7] Uenishi A., Teodosiu C. (2004). Constitutive modelling of the high strain rate behaviour of interstitial-free steel. International Journal of Plasticity, vol. 20, pp. 915-936.
- [8] Amodio D., Broggiato G. B., Sasso M. (2003). Determinazione della curva True Stress-Strain con prove dinamiche a trazione. XXXII Convegno AIAS, Salerno.